

М249502

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище им. Н. Э. Баумана

НАЗАРЯН Эрнест Агаджанович

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫТЯЖКИ
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ
НЕОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК

05.03.05. — Технология и машины обработки давлением

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в МВТУ им. Баумана

Научный руководитель —

доктор технических наук, профессор Е. А. ПОПОВ

Официальные оппоненты:

заслуженный деятель науки и техники РСФСР

доктор технических наук, профессор НОРИЦЫН И. А.,

кандидат технических наук, доцент КОВАЛЕВ В. Г.

Ведущее предприятие указано в решении Ученого Совета

Автореферат разослан «22» ноября

1974 г.

Защита диссертации состоится «23» декабря

1974 г.

на заседании Совета факультета «Автоматизация и механизация производства» Московского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшего технического училища имени Н. Э. Баумана по адресу: Москва, 107005, 2-я Бауманская 5.

авверенные печатью, про-

ся в библиотеке МВТУ

СТЕПАНОВ Ю. А.

М249502

Актуальность проблемы. Повышение технического уровня и эффективности производства является важнейшей народнохозяйственной задачей. Совершенствование и повышение экономической эффективности технологических процессов требуют тщательного их изучения и обоснованной разработки основ теории и методов экспериментального исследования этих процессов.

Широкое применение в промышленности методов обработки металлов давлением предъявляет повышенные требования к эффективности применяемых технологических процессов. Эта задача решается как за счет внедрения в производство новых, так и за счет совершенствования существующих технологических процессов.

В разработке и внедрении оптимальных технологических процессов особое место занимает обоснованный выбор рациональной формы и размеров заготовки, обеспечивающих возможность повышения степени использования материала.

В листовой штамповке одним из наиболее распространенных процессов является вытяжка полых цилиндрических изделий. Изготовление цилиндрических изделий вытяжкой обычно сопровождается значительным отходом листового металла, и, в ряде случаев, требует применения нескольких вытяжных переходов. Сокращение количества переходов и уменьшение отходов при вытяжке является актуальной задачей.

Цель исследования. Целью настоящей работы является раскрытие механизма деформирования неосесимметричной листовой заготовки при вытяжке в цилиндрической матрице, выявление основных факторов, влияющих на процесс деформирования, для определения технологических возможностей этой операции.

Методы исследования. Для исследования нестационарного процесса деформирования неосесимметричных заготовок применен метод муаровых полос. Основные аналитические решения получены методом совместного решения уравнений равновесия и условия пластичности при установленном характере зависимости касательного напряжения от координат. Экспериментально исследованы напряженное состояние фланца и влияние технологических факторов на процесс вытяжки.

Научная новизна. Основные зависимости, характеризующие процесс вытяжки при отсутствии осевой симметрии деформирования, получены на основе разработанной нами методики исследования не-

НТБ МГТУ им. Н. Э. Баумана



1249502

Назарян Э.А. Исследование

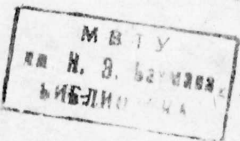
стационарного процесса вытяжки с применением полос муара, позволяющей установить поля перемещений, деформаций и напряжений в переменных Лагранжа. Разработанная методика теоретического анализа позволяет получить замкнутые решения для полей деформаций и напряжений, учитывающие зависимость касательного напряжения от двух координат. На основе полученных аналитических решений и экспериментальных исследований, проведенных методом муаровых полос, установлена оптимальная форма неосесимметричной листовой заготовки, обеспечивающей получение цилиндрических изделий наибольшей высоты при наименьшем расходе материала. Исследования полей деформаций и напряжений при отсутствии осевой симметрии деформирования, оценка влияния относительной толщины заготовки, коэффициента вытяжки и форм заготовки позволяют раскрыть механизм деформирования неосесимметричной листовой заготовки в цилиндрической матрице и выявить влияние технологических факторов на процесс вытяжки.

Практическая ценность. В результате проведенных исследований разработан и внедрен в производство технологический процесс вытяжки цилиндрических деталей из неосесимметричных заготовок. Оптимальная форма листовой заготовки признана изобретением и защищена авторским свидетельством.

Данная диссертационная работа является составной частью исследований, проводимых на кафедре "Машины и автоматизация обработки давлением" МВТУ им. Баумана в области разработки и анализа технологических процессов листовой штамповки и посвящена исследованию мало изученного процесса вытяжки цилиндрических изделий из неосесимметричных заготовок, обеспечивающего уменьшение потерь металла при штамповке.

Апробация работы. По основным разделам работы сделано два доклада на научных семинарах кафедры АМ-6 МВТУ им. Баумана в течение 1972-1974 гг. и доклад на IX научно-технической конференции Тульского политехнического института, Тула, 1973 г.

Объем работы. Диссертационная работа изложена на 128 страницах машинописного текста, включающих в себя введение, четыре главы, выводы по каждой главе, общие выводы по работе и приложение. Содержит 5 таблиц, 67 рисунков и список литературы из 56 наименований.



В первой главе анализируются существующие способы использования неосесимметричных заготовок для вытяжки цилиндрических изделий. Анализируются работы, связанные с рассмотрением на-приженно-деформированного состояния при отсутствии осевой сим-метрии и методов экспериментальных исследований при нестационар-ных процессах деформирования.

В отечественной и зарубежной литературе опубликован ряд работ (Иковлева С.П., Шевелева В.В., Рнина М.А., Galinowski J., Sewerby R., Johnson W. и др.), направленных на поиски спосо-бов использования неосесимметричных заготовок для вытяжки цилин-дрических изделий. При этом экспериментальными исследованиями установлено, что использование квадратной заготовки вместо круг-лой приводит к приросту высоты вытягиваемого изделия, завися-щей от механических характеристик материала и технологических параметров вытяжки. Однако в литературе отсутствуют работы, объ-ясняющие причины и механизм образования прироста высоты и не вы-явлены наиболее рациональные области применения квадратной заго-товки вместо круглой.

Математические строгие решения по определению полей напря-жений и деформаций при отсутствии осевой симметрии деформирова-ния, выполненные (Ильиным А.А., Качановым Л.М., Соколовским В.В. и др.) по теории течения, либо по деформационной теории, как пра-вило, не приводят к замкнутым аналитическим зависимостям и в каждом конкретном случае требуется выполнения численного интег-рирования. Для практики листовой штамповки имеет особое значе-ние получение решений в замкнутом виде, позволяющее оценить влияние основных факторов на процесс вытяжки.

Имеющиеся приближенные решения выполнены (Поповым Е.А., Овчинниковым А.Г., Ковалевым В.Г. и др.) в предположении, что очаг пластических деформаций охватывает весь фланец заготовки, а касательное напряжение зависит от одной координаты θ . Сле-дует однако отметить, что в процессе деформирования очаг пла-стических деформаций меняет свою форму и размеры и в началь-ных этапах вытяжки не может охватить весь фланец заготовки. Поэтому в ряде случаев учет зависимости касательного напряжения от двух координат $Q; \theta$ и установление вероятных границ очага может привести к существенному уточнению анализа процесса вытяжки.

При исследовании деформированного состояния при нестационарных процессах последние годы большое распространение получил метод муаровых полос. Однако существующие методы муара разработаны для исследования напряженно-деформированного состояния в области малых упруго-пластических деформаций. Определение конечных деформаций и напряжений обычно выполняется в предположении, что материал находится в идеальном жестко-пластическом состоянии и не учитывается история нагружения. Однако в процессах листовой штамповки существенное влияние на поле напряжений и деформаций оказывает упрочнение металла. Поэтому существующие методы муара нуждаются в усовершенствовании применительно к изучению процесса вытяжки, с тем, чтобы получить информацию о характере нарастания деформаций в условиях нестационарного процесса вытяжки изделий из неосесимметричных заготовок.

В соответствии с целью исследования были поставлены следующие задачи:

1. Исследование кинематики течения материала во фланце неосесимметричной заготовки для выбора и обоснования расчетной модели деформирования.

2. Разработка методики исследования нестационарного процесса вытяжки методом муаровых полос для случая конечных величин деформаций.

3. Теоретический анализ процесса вытяжки неосесимметричной заготовки в цилиндрической матрице, раскрывающий причины и механизм возникновения прироста высоты при замене круглой заготовки неосесимметричной и определение допустимых степеней деформаций.

4. Определение полей напряжений и деформаций во фланце, учитывающие форму исходной заготовки и отыскания на этой основе формы оптимальной заготовки и зависимостей, характеризующих величину прироста высоты от технологических параметров вытяжки.

Во второй главе изложены результаты исследования нестационарного процесса деформирования методом муаровых полос. Создана экспериментальная установка, включающая установку для экспонирования, центрифугу для нанесения светочувствительной эмульсии и экспериментальная оснастка. Эксперименты проводили на универсально-испытательной машине УИМ-50. Для получения картин муаро-

вых полос использовали растр с прямыми параллельными линиями с частотой 24 линий и 64 линий на 1 см. В экспериментах использовались листовые заготовки разной формы, вырезанные из листов стали 08К1 и алюминиевого сплава АМц, на которые наносили сетку из взаимно перпендикулярных линий. В основу методики определения полей деформаций и напряжений положена возможность поэтапного рассмотрения процесса вытяжки. Поскольку при поэтапном деформировании муаровые полосы показывают поле перемещения точек деформированной заготовки, разработана методика перехода от картин муаровых полос к перемещениям определенных точек заготовки (переход от координат Эйлера к координатам Лагранжа).

На основе поэтапного исследования процесса деформирования и применяя разработанную методику установлен характер изменения формы и размеров очага деформаций и определены границы упруго-пластических зон. Установлено, что размеры очага пластических деформаций с одной стороны уменьшаются, поскольку происходит образование цилиндрической стенки в очке матрицы, а с другой стороны, увеличиваются за счет поступления нового материала из упруго-деформированных зон. Исследование кинематики течения материала во фланце несимметричной заготовки показало, что радиальные перемещения распределяются вокруг очка матрицы неравномерно. Наряду с радиальными перемещениями точек во фланце имеют место и тангенциальные перемещения, которые имеют наибольшие значения у внешней границы очага пластических деформаций. Поля деформаций и напряжений установлены с использованием результатов исследования кинематики течения, уравнений деформационной теории пластичности и кривых упрочнений. Получено, что наибольшие растягивающие напряжения возникают в направлениях наибольшей ширины фланца. Тангенциальные напряжения распределяются вокруг очка матрицы неравномерно. Во фланце возникает касательное напряжение $\tau_{\theta\varphi}$, которое имеет наибольшее значение у внешней границы очага пластических деформаций, не превышающее $0,1\sigma_s$ и наименьшее у контура очка матрицы. Благодаря такому распределению касательного напряжения по координатам φ и θ элементы фланца в направлении к серединам сторон квадратной заготовки получают деформацию растяжения больше, чем соседние элементы.

Результаты установленных полей перемещений, деформаций и

напряжений использовали для обоснования и выбора расчетной модели деформирования заготовки.

В третьей главе приведены результаты теоретического анализа процесса вытяжки цилиндрических изделий из неосесимметричных листовых заготовок.

Процесс вытяжки цилиндрических изделий из неосесимметричных заготовок характеризуется отсутствием осевой симметрии деформирования. Это приводит к неравномерному распределению нормальных напряжений σ_φ и σ_θ во фланце заготовки. В связи с этим соответствующие им перемещения и деформации также распределяются неравномерно. Эти обстоятельства существенно осложняют анализ процесса деформирования. Для упрощения анализа и получения замкнутых решений в работе сформулированы следующие основные допущения:

Сравнительная малая величина удельных усилий, необходимых для предотвращения складкообразования, позволяет считать, что деформирование осуществляется при плоском напряженном состоянии. Пренебрегаем влиянием упрочнения и контактных касательных напряжений, действующих между заготовкой и матрицей, на поле напряжений во фланце.

Используется уравнение равновесия в полярной системе координат

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial \sigma_\varphi}{\partial \rho} + \frac{\partial \tau}{\partial \theta} + \sigma_\varphi - \sigma_\theta = 0, & (1) \\ \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \rho \frac{\partial \tau}{\partial \rho} + 2\tau = 0. & (2) \end{cases}$$

В работе показано, что достаточно простое замкнутое решение с использованием условия пластичности Треска-Сен-Венана

$$(\sigma_\varphi - \sigma_\theta)^2 + 4\tau^2 = \sigma_s^2 \quad (3)$$

можно получить при известном характере изменения касательного напряжения от координат.

Для установления полей касательных напряжений использовали результаты нестационарного процесса вытяжки методом муаровых полос. Показано, что касательное напряжение можно определить при известном распределении компонент перемещений U_φ и U_θ . На основе результатов исследований по определению полей деформаций и

напряжений методом муаровых полос очаг пластических деформаций схематизирован в виде окружности, вписанной в квадрат, на границе которого наложены нормальные напряжения σ_e' , пропорциональные значениям ширины жестких зон и касательные напряжения τ_{gr} . При определении полей перемещений U_e и U_θ рассмотрено деформирование заготовки в двух крайних случаях: в плоско-деформированном и плоско-напряженном состояниях и показано, что при практически осуществимых степенях деформаций ($\frac{\sigma_0}{\sigma_s} = 2$) вид напряженно-деформированного состояния несущественно сказывается на поле перемещений. Для компонент перемещений установлены следующие аналитические зависимости

$$U_e = -\Delta h \frac{r}{R} - 0,3\Delta h \frac{\frac{R}{r}-1}{K(K-1)} \left(2 \frac{\theta^3}{\alpha^3} - 3 \frac{\theta^2}{\alpha^2} \right); \quad (4)$$

и

$$U_\theta = 0,3\Delta h \frac{\frac{R}{r}-1}{K(K-1)} \left(\frac{\theta^4}{2\alpha^3} - \frac{\theta^3}{\alpha^2} + \frac{\alpha}{2} \right). \quad (5)$$

Использование полученных зависимостей с учетом результатов исследования полей деформаций и напряжений, проведенных методом муаровых полос, позволило установить распределение касательного напряжения и аппроксимировать зависимость $\tau_{e\theta}$ от q ; θ следующей аналитической функцией.

$$\tau_{e\theta} = -\frac{\sigma_s}{2} \alpha \frac{q}{R} \frac{\theta}{\alpha} \left(\frac{\theta}{\alpha} - 1 \right), \quad (6)$$

где α — некоторый параметр, зависящий от коэффициента вытяжки и формы исходной заготовки.

Распределение нормальных напряжений находится из совместного решения уравнений равновесия (1,2) и условия пластичности (3), с учетом установленной зависимости касательного напряжения от координат (6).

$$\sigma_e = \frac{\alpha d}{4} \sigma_s \frac{\cos \alpha}{1 - \cos \alpha} \frac{1 - \cos \theta}{\cos \theta} - \frac{\alpha}{2\alpha} \sigma_s \left(\frac{2\theta}{\alpha} - 1 \right) \left(1 - \frac{q}{R} \right) + \quad (7)$$

$$+ \sigma_s \ln \frac{1 + \sqrt{1 - A^2 \frac{q^2}{R^2}}}{1 + \sqrt{1 - A^2}} \frac{R}{q} - \sigma_s \left(\sqrt{1 - A^2 \frac{q^2}{R^2}} - \sqrt{1 - A^2} \right), \quad (8)$$

и

$$\sigma_\theta = \sigma_e - \sigma_s \sqrt{1 - A^2 \frac{q^2}{R^2}};$$

где

$$A = \alpha \frac{\theta}{\alpha} \left(\frac{\theta}{\alpha} - 1 \right).$$

В работе показано, что формулы (7) и (8) переходят в формулы для главных напряжений при вытяжке цилиндрических изделий из круглых заготовок при отсутствии касательных напряжений в координатах Q, θ .

Используя установленное поле напряжений и принимая, что разрушение заготовки имеет место при достижении наибольшими растягивающими напряжениями у входа в матрицу значения, равного пределу текучести, найдена формула (9) для определения предельной степени деформаций.

$$\frac{R}{r} = \exp \left[1 - \frac{a}{2a} \left(1 - \frac{r}{R} \right) - \frac{a\alpha}{4} \right]. \quad (9)$$

Для расчета конечного формоизменения заготовки использовались установленные поля нормальных напряжений и уравнения связи напряжений и деформаций при допущении о монотонности процесса формоизменения в главных направлениях. Такой подход позволил приближенно рассчитать высоты изделия по впадинам и получить аналитическую зависимость прироста высоты от технологических параметров вытяжки и формы заготовки

$$\frac{h_k}{r} = \frac{K}{3K - \frac{2a}{\pi} (K-1)} \left\{ \left[K+3 - \frac{2a}{\pi} \left(\frac{K-1}{K} \right) \right] (K-1) + \right. \\ \left. + \frac{K-3 + \frac{2a}{\pi} \left(\frac{K-1}{K} \right)}{3 - \frac{2a}{\pi} \left(\frac{K-1}{K} \right)} K \ln \frac{2K \left[1 - \frac{a}{\pi} \left(\frac{K-1}{K} \right) \right]}{3 - \frac{2a}{\pi} \left(\frac{K-1}{K} \right) - K} \right\}. \quad (10)$$

На основе полученной формулы (10) и установленного соотношения нормальных напряжений $\frac{\sigma_z}{\sigma_\theta}$ показано, что причиной возникновения прироста высоты изделий, вытянутых из неосесимметричных заготовок, является изменение соотношения $\frac{\sigma_z}{\sigma_\theta}$ по сравнению с вытяжкой из круглых заготовок. Сопоставление полученной зависимости высоты от коэффициента вытяжки (10) с аналогичной при вытяжке из круглых заготовок показывает, что наибольшая величина относительного прироста $\left(\frac{h - h_0}{h_0} \cdot 100\% \right)$ имеет место при использовании квадратной заготовки и не превышает 10%.

Рассмотрено влияние формы заготовки на величину размеров очага деформаций и показано, что на величину относительного прироста существенное влияние оказывает соотношение нормальных напряжений $\frac{\sigma_z}{\sigma_\theta}$. Задача по отысканию оптимальной формы заготовки решена методом линий скольжений с использованием результа-

тов по исследованию нестационарного процесса вытяжки методом муаровых полос и аналитических решений. Получено, что на величину относительного прироста влияют размеры угловых жестких зон заготовки. Аналитическими расчетами установлено, что оптимальной является квадратная заготовка со срезанными углами и размером в диагональном направлении примерно $1,2 R_0$. Уменьшение жестких зон больше указанной величины приводит к уменьшению размеров очага и соотношения $\frac{\sigma_a}{\sigma_0}$. Полученные результаты в достаточной степени согласуются с данными экспериментальных исследований.

В главе IV изложены результаты экспериментальных исследований по определению нормальных напряжений во фланце и влияние технологических факторов на процесс вытяжки.

В основу методики определения нормальных напряжений во фланце вытягиваемого цилиндрического изделия положена возможность использования разрезанной, по направлениям действия главных нормальных напряжений, заготовки, которая деформируется в штампе со специальными устройствами для замера тангенциальных усилий. Из разрезанных заготовок вытягивается изделие, равное половине полного цилиндрического изделия. Одна поверхность сечения заготовки упирается в торцы месдоз, выполненных в виде параллелепипедов, на две грани которых наклеены фольговые тензодатчики сопротивления. Месдозы встроены в матрицу вдоль радиуса заготовки. Возникающие во фланце заготовки тангенциальные напряжения вызывают реакцию со стороны практически неподвижного чувствительного элемента-месдозы. Зная величину этого реактивного усилия для каждой месдозы и истинную площадь контакта торца заготовки с месдозами определяли средние тангенциальные напряжения, действующие на торец чувствительного элемента по формуле

$$\sigma_{\text{ср}i} = \frac{P_i}{F_i} \quad (II)$$

где P_i — усилие, воспринимаемое i -ой месдозой, F_i — истинная площадь контакта i -ой месдозы с торцом заготовки.

Запись тангенциальных усилий и хода пуансона производилась с помощью тензоусилителя 8АН4 и осциллографа И-700М. В экспериментах использовалась рулонная сталь 08КП ГОСТ 914-56, толщиной 1 мм. Все текущие параметры процесса вытяжки регистрировались с помощью осциллографа. На основании полученных данных

строились графики изменения тангенциальных напряжений $\sigma_{\theta r}$ в зависимости от величины смещения края фланца при разных формах исходной заготовки. Установлено, что тангенциальные напряжения, при данной величине смещения края фланца для квадратной заготовки в направлении апофемы меньше, чем для круглой заготовки. Величина тангенциального напряжения зависит от формы исходной заготовки и расположения рассматриваемого элемента по ширине фланца. Для сопоставления результатов экспериментов с теоретическими решениями получены формулы, характеризующие изменение средних тангенциальных напряжений в данной точке пространства,

для круглой заготовки

$$\rho_{\theta i} = \sigma_s \left(r_i \ln \frac{R}{r_i} - r_{i+1} \ln \frac{R}{r_{i+1}} \right), \quad (12)$$

для квадратной заготовки

$$\rho_{\theta i} = \sigma_s \left[r_i \ln \frac{R}{r_i} - r_{i+1} \ln \frac{R}{r_{i+1}} - \frac{2}{\pi} (r_{i+1} - r_i) + \frac{1}{\pi} \frac{r_{i+1}^2 - r_i^2}{R} \right], \quad (13)$$

где r_i и r_{i+1} — соответственно координаты начала и конца точек контакта заготовки с i -ой мездозой; R — текущий радиус внешнего контура. Сопоставление результатов экспериментов с расчетными данными показал удовлетворительную сходимость, что свидетельствует о приемлемости принятых допущений и достаточной точности полученных расчетных формул.

Для выявления влияния отдельных технологических факторов на величину прироста высоты и проверки справедливости разработанных теоретических зависимостей проводились экспериментальные исследования. Эксперименты проводились на универсально-испытательной машине УИМ-50 со скоростью движения траверсы $30 \frac{\text{мм}}{\text{мин}}$, а также в заводских условиях на механическом кривошипном прессе с номинальным усилием 40 т. Исследовалось влияние форм заготовки, относительной толщины, коэффициента вытяжки и механических характеристик материала на величину прироста высоты. В экспериментах использовались материалы с различной интенсивностью упрочнения: сталь 08КП и алюминиевый сплав АМц, толщиной 0,5 мм, 1,0 мм и 1,5 мм. В качестве показателя для сравнения принималась величина относительного прироста высоты, вычисленной по выражению

$$f_k = \frac{h_k - h_0}{h_0} \cdot 100\%, \quad (14)$$

где h_k - высота изделия вытянутого из квадратной заготовки
 h_0 - высота изделия вытянутого из круглой заготовки;

На основе полученных результатов установлено, что наибольший относительный прирост высоты достигается при использовании квадратной заготовки со срезанными углами и размером в диагональном направлении примерно 1,2R. При этом получено, что с увеличением коэффициента вытяжки ($\frac{D_0}{d_n}$) и относительной толщины заготовки величина прироста высоты уменьшается. Полученные результаты, а также ряд дополнительных проверок при разных относительных толщинах показывают, что предлагаемая форма заготовки, найденная на основе исследования кинематики течения методом муаровых полос и теоретического анализа достаточно хорошо согласуется с экспериментальными данными. Удовлетворительная сходимость расчетных и фактических размеров оптимальной заготовки в исследуемом диапазоне коэффициента вытяжки ($1,48 \leq \frac{D_0}{d_n} \leq 1,78$) показывает, что основные допущения, принятые в анализе, приемлемы и соответствуют реальным условиям деформирования. Эксперименты, проведенные с целью определения допустимой степени деформации показали, что коэффициент вытяжки определенный как отношение диаметра вписанной окружности к диаметру вытягиваемого изделия для заготовки, имеющей форму квадрата со срезанными углами, для исследованных материалов колеблется в пределах 1,75 + 1,85, т.е. примерно на 20% меньше, чем при вытяжке из круглой заготовки. Такое же снижение допустимого коэффициента было установлено и в результате теоретического анализа.

Общие выводы

1. Разработана и экспериментально обоснована методика исследования напряженно-деформированного состояния методом муаровых полос, позволяющая установить количественные зависимости между полями перемещений, деформаций и напряжений при нестационарных процессах деформирования. Эта методика использовалась при исследовании вытяжки цилиндрических изделий из неосесимметричных заготовок.

2. На основе поэтапного рассмотрения характера формоизменений неосесимметричной заготовки в процессе вытяжки получены зависимости для полей перемещений и напряжений, учитывающие упрочнение материала, и установлено, что экстремальные напря-

жения σ_{θ} возникают в диагональных направлениях при определенном смещении наружного контура заготовки.

3. Теоретическим анализом и экспериментальными исследованиями показано, что касательное напряжение, возникающее во фланце неосесимметричной заготовки, зависит от двух координат $Q; \theta$. При этом получено, что при обычно достигаемых степенях деформаций наибольшая величина касательного напряжения не превышает 0,16 σ_s .

4. Анализ напряженно-деформированного состояния, выполненный методом совместного решения уравнений равновесия с условием пластичности, при принятой зависимости касательного напряжения от координат, позволил получить замкнутые решения для полей напряжений и деформаций, учитывающие форму и размеры исходной неосесимметричной заготовки.

5. Установленные поля напряжений и деформаций во фланце неосесимметричной заготовки показывают, что причиной прироста высоты изделий, вытянутых из неосесимметричных заготовок, является изменение соотношения $\frac{\sigma_{\theta}}{\sigma_s}$ по сравнению с вытяжкой из круглых заготовок. При этом получено, что наибольшая величина относительного прироста высоты $(\frac{h_k - h_s}{h_s} \cdot 100\%)$ не превышает 10%.

6. На основе экспериментального исследования кинематики течения материала во фланце и теоретического анализа, выполненного методом линий скольжений, установлено, что наибольший прирост высоты имеет место при вытяжке квадратной заготовки с обрезанными углами и размером в диагональном направлении, равным примерно 1,2 R_s .

7. Разработана методика и создана экспериментальная установка для определения средних нормальных напряжений, позволяющая установить действительные поля напряжений. Удовлетворительная сходимость теоретических и экспериментальных результатов свидетельствует о приемлемости принятых допущений и достаточной точности полученных расчетных формул.

8. Применение заготовки в виде квадрата со срезанными углами при вытяжке цилиндрических изделий взамен круглой позволяет уменьшить потери металла без усложнения технологического процесса и удорожания штампа. Внедрение предложенной технологии на заводе АТЭ-1 на одной только детали корпуса дало годовую экономию

пять тыс. рублей.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Назарян Э.А., Кондратенко В.Г. Листовал заготовка для вытяжки цилиндрического стакана. Авторское свидетельство №390856 Бюллетень №1, 1973 г.

2. Кондратенко В.Г., Назарян Э.А. Применение метода муара для исследований деформаций во фланце при вытяжке несимметричных деталей. "Известия вузов. Машиностроение". №6, 1974 г.

3. Кондратенко В.Г., Назарян Э.А. О напряженном состоянии фланца при вытяжке цилиндрических деталей из квадратных заготовок, "Известия вузов. Машиностроение". №8, 1974г.

4. Антипов Н.Н., Кондратенко В.Г., Назарян Э.А. Усовершенствованная конструкция ходографа, "Известия вузов. Машиностроение" №12, 1973г.